

2011 年 1 月 6 日

博士学位申請論文審査報告書

大学名	早稲田大学
研究科名	スポーツ科学研究科
申請者氏名	岩沼 聡一郎
学位の種類	博士（スポーツ科学）
論文題目	足関節底屈筋群における弾性要素 Elastic component of ankle plantar flexor muscles
論文審査員	主査 早稲田大学教授 川上 泰雄 博士（教育学）（東京大学） 副査 早稲田大学教授 矢内 利政 Ph.D.（アイオワ大学） 副査 早稲田大学教授 福林 徹 医学博士（筑波大学）

本論文は第 1 章から第 4 章までの本論と文献から構成されている。

人間の多くの身体運動において、歩行などの移動運動のための推進力を生み出すのは、主として足関節底屈運動であり、その原動力となるのは主働筋である下腿三頭筋の発揮張力である。下腿三頭筋はアキレス腱を介して、足部に接続している。この解剖学的背景から、足関節底屈筋群は下腿三頭筋腱複合体 (MTU) を主とし、その収縮要素は下腿三頭筋が、その弾性要素はアキレス腱が担うと考えられてきた。しかし、足関節底屈筋群における弾性要素の解剖学的所在はブラックボックスのままであった。そこで本論文では、足関節底屈筋群における弾性要素の解剖学的所在を明らかにし、それらの機能的意義について議論することを目的とした。

まず研究1では、等尺性足関節底屈トルク発揮に伴うアキレス腱の変形について検討した。アキレス腱内には、腱膜部分と外部腱部分が存在する。腱膜部分にはヒラメ筋が付着するが、外部腱部分には筋が付着しない。こうした解剖学的背景の違いから、筋収縮に伴い、アキレス腱内では複雑な応力分布、またそれに対する複雑なひずみ分布を示すことが考えられる。しかし、これまでの人間生体アキレス腱を対象にした研究では、縦ひずみのみの検討にとどまっていた。また、先行研究では、アキレス腱内の一部の標認点の変位と、足関節角度から求めたMTU長変化の差分から、腱伸長を推定しており、アキレス腱全体の変形を十分に捉えることができていなかった可能性があった。そこで、MRI法を用いてアキレス腱全体を撮像し、腱膜部分および外部腱部分において、縦ひずみおよび横ひずみをそれぞれ定量した。その結果、等尺性足関節底屈トルク発揮時に腱膜部分と外部腱部分はいずれも縦方向への伸長を示したが、その程度は腱膜部分より外部腱部分で顕著であった。腱膜部分は、最大随意発揮30%までの強度では縦方向のみならず横方向へも伸長が示された

が、それ以上の強度では、縦方向および横方向いずれの方向でもさらに伸長することはなかった。また、外部腱部分では、これまで報告されてきた縦ひずみよりも低い値が示された。この結果は、先行研究でアキレス腱の伸長が過大評価されていたことを示すものである。

続いて研究2では、受動的な足関節底背屈に伴うアキレス腱の変形について検討した。等尺性足関節底屈トルク発揮課題中、実際は足関節が底屈方向へ回転し、下腿三頭筋MTUが短縮する。この際、アキレス腱の変形は、筋の発揮張力と、MTU長依存の受動張力の合力によって生じる。また、受動的に関節角度 (i.e., MTU長) を変化させた場合、筋が変形し他の組織との相対的な位置関係が変化する。これにより、MTU内の内圧や応力分布が変化する可能性がある。これらの点から、正味のアキレス腱の変形を明らかにするためには、MTU長変化がアキレス腱の変形に及ぼす影響について検討する必要がある。そこで、受動的に足関節角度 (i.e., MTU長) を変化させ、その際のアキレス腱腱膜部分および外部腱部分の変形 (縦ひずみおよび横ひずみ) を定量した。その結果、腱膜部分と外部腱部分はいずれも、足関節底屈時に縦方向および横方向への変形が認められなかった。一方、背屈時には、腱膜部分と外部腱部分はいずれも縦方向へ有意に伸長し、腱膜部分の一部と、外部腱部分で横方向への有意な伸長が認められた。これは、足関節背屈に伴い、単に縦方向に張力が生じるのではなく、MTU内の内圧や応力分布が複雑に変化することを示唆する結果であった。

上記の2つの研究は現在、国際誌に投稿し、査読後の訂正中である。

Iwanuma, S., Akagi, R., Kurihara, T., Ikegawa, S., Kanehisa, H., Fukunaga, T., Kawakami, Y. Longitudinal and transverse deformation of human Achilles tendon induced by isometric plantar flexion at different intensities. *Journal of Applied Physiology* (under revision).

研究3では、等尺性足関節底屈トルク発揮に伴う足アーチ角の変化および踵骨隆起の変位について検討した。下腿三頭筋の発揮張力により、アキレス腱の停止部である踵骨隆起は近位へ牽引され、変位する。踵骨隆起の変位は、足部全体の回転と、距骨下の骨の相対的な位置変化 (足部の変形) によって起こる。先行研究において、足部はアキレス腱の張力に応じて変形することが示唆されている。そこで、等尺性足関節底屈トルク発揮時に、足部全体の回転と足部の変形が、踵骨隆起の変位におよぼす影響について明らかにすることを目的とした。力発揮レベルの増加に伴い、足アーチ角が増大を示し、踵骨隆起が近位へ変位した。また、足アーチ角変化と踵骨隆起の変位は、正の相関関係が認められた。すなわち、等尺性足関節底屈トルク発揮時に、足部は剛体として振る舞わず、足部の変形が踵骨隆起の変位に影響を及ぼすことが示された。また、力発揮に伴う踵骨隆起の変位は、約3割が足部全体の回転によるものであり、残りの7割が足部の変形によるものであることが明らかとなった。

上記の研究は、下記の学術論文として国内誌に掲載されている。

岩沼聡一郎，赤木亮太，栗原俊之，福永哲夫，川上泰雄．等尺性足関節底屈トルク発揮に伴う足アーチの開裂および踵骨隆起の変位．東京体育学研究, 1: 59-63, 2010.

研究4では、足関節角度-下腿三頭筋MTU長関係に足部の変形が及ぼす影響について検討した。これまでの研究では、足関節角度を独立変数としたMTU長変化の推定式が、広く用いられてきた。下腿三頭筋MTU長変化には、MTUが停止する踵骨隆起の変位が直接影響するため、このMTU長推定式では足関節角度と踵骨隆起の変位が対応するという仮定が必要であった。しかし、別の先行研究では、同じ足関節角度であっても、等尺性足関節底屈トルク発揮時の踵骨隆起の近位への変位は、受動底屈時の踵骨隆起の変位より大きいことが示されている。研究3の結果を踏まえると、この原因として下腿三頭筋の収縮に伴う足部の変形の影響が考えられた。そこで、足関節角度-下腿三頭筋MTU長関係について、足部の変形が及ぼす影響について検討した。その結果、底屈トルク発揮時に実測されたMTU長変化は推定値より有意に大きく、受動底屈時に実測された値が推定値より有意に小さかった。MTUは、同じ足関節角度であっても、等尺性足関節底屈トルク発揮時のほうが受動底屈時より顕著に短縮した。その際、足アーチ角は、等尺性足関節底屈トルク発揮時に増加し、受動底屈時に減少した。これらの結果から、下腿三頭筋MTU長変化は足関節角度のみでは評価できないこと、また、足関節角度-下腿三頭筋MTU長関係は一定ではなく、足アーチ角の変化の影響も受けることが示された。研究1で示唆された、先行研究における腱伸長の過大評価は、足関節角度から求めたMTU長変化を用いていたことによって起こったものと考えられる。

上記の研究は、現在、国際誌に投稿中である。

Iwanuma, S., Akagi, R., Hashizume, S., Kanehisa, H., Yanai, T., Kawakami, Y. Triceps surae muscle-tendon unit length changes as a function of ankle joint angles and contraction levels: the effect of foot arch deformation. *Journal of Biomechanics* (under review).

本論文の一連の研究の結果をまとめると、1) 筋収縮時の縦ひずみは、アキレス腱の外部腱部分が腱膜部分より有意に大きいこと、2) アキレス腱の腱膜部分は、筋収縮時に縦方向および横方向に伸長すること、3) 足関節受動背屈時にアキレス腱の腱膜部分および外部腱部分で縦方向にも横方向にも伸長すること、4) 筋収縮に伴い足アーチ角が増大すること、5) 下腿三頭筋MTUの長さ変化には、足部全体の回転だけではなく足部の変形も影響すること、が示された。すなわち、足関節底屈筋群の弾性要素として、アキレス腱のみならず足部も振る舞うことが明らかとなった。また、1) 軟組織の変形の程度が下腿三頭筋の筋束長に及ぼす影響は、足部がアキレス腱より大きいこと、2) 下腿三頭筋筋腱複合体の受動伸長時 (i.e., 足関節背屈時) に、下腿三頭筋の筋束が伸長される程度を減弱するはたらきは、足部がアキレス腱より貢献していることが示唆された。

本論文は、足関節底屈筋群における直列弾性要素の解剖学的所在を明らかにしたものであり、本論文の知見は足関節底屈運動のメカニズムをより深く理解していく上で重要であ

る。これらの点において、本論文はスポーツ科学の発展に大いに寄与するものであると考えられる。本申請者の今後の研究上の活躍が大いに期待できる。

上記のような評価を得て、本審査委員会は、岩沼 聡一郎氏の学位申請論文が博士（スポーツ科学）の学位を授与するに十分値するものと認める。

以 上